

CARACTERIZACIÓN DE UNA GUÍA DE ONDA ACÚSTICA

ACOUSTIC WAVEGUIDE CHARACTERIZATION

Diego M. Tuozzo^a y Tomás Echarri^b

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47, 1900 La Plata, Argentina, martintuozzo@hotmail.com

^bUIDET IAME, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47, 1900 La Plata, Argentina, tomas.echarri@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se ha incrementado el número de sistemas de altavoces para aplicaciones profesionales de audio diseñados bajo la configuración de arreglo lineal (line array). Estos sistemas constan, generalmente, de módulos que poseen un panel frontal en cuya parte central se ubica la unidad de alta frecuencia (AF) compuesta por uno o más motores de compresión (*drivers*), capaces de reproducir frecuencias que van de 1 kHz a 20 kHz, acoplado/s a una guía de onda. Este dispositivo de haz convergente geométricamente posee el alto de un módulo del arreglo lineal, de modo que cuando estos son ensamblados para constituir un sistema completo el resultado es una disposición lineal de fuentes aproximadamente continua.

Cada fuente de AF debe cumplir con los criterios precisos para que el sistema se comporte como predice la teoría de las fuentes de línea. El criterio más importante es la coherencia de fase: el frente de onda (de sonido) a la salida de la guía de onda debe ser plano (isofásico) hasta la frecuencia más alta de interés.

2. GUÍA DE ONDA ACÚSTICA

Una guía de onda es un dispositivo técnico que permite controlar la directividad de una fuente sonora de manera proporcional respecto a la frecuencia en su plano vertical. En el plano horizontal se comporta de manera similar a una bocina de directividad constante.

La gran ventaja de estos dispositivos radica en que permite configurar arreglos de alto solapado, es decir, arreglos con gran cantidad de elementos y poca separación angular entre ellos (Digón y Ferrer, 2015). Esto trae aparejado un acoplamiento muy eficaz entre fuentes a alta frecuencia (de 10 kHz a 16 kHz de manera general), con gran control direccional y baja interferencia destructiva entre los frentes de ondas del espectro de frecuencias (nuevamente, de manera especial, a alta frecuencia). Esto es posible gracias a su principio de funcionamiento el cual radica en minimizar la distancia entre transductores y prevenir la interferencia acústica por separación física (distancia entre elementos).

Con el paso del tiempo los diferentes fabricantes de sistemas de refuerzo sonoro han propuesto cada uno una geometría diferente para dar respuesta al problema de la directividad con las guías de onda. Independientemente de la geometría elegida, el principio de funcionamiento

de la solución es único: controlar la evolución del frente de onda desde la garganta de la guía de onda hasta el perfil seccional elegido a la salida para reducir las diferencias de camino existentes y en consecuencia igualar los tiempos de arribo en la boca de la guía de onda. El producto es un frente de onda plano (isofásico) en el rango útil del motor de compresión.

En el presente trabajo se presenta el análisis armónico de la guía de onda acústica tipo *tapered* cuya geometría exterior e interior se puede observar en la figura 1. Las especificaciones generales del dispositivo a analizar se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones generales de la guía de onda tipo *tapered* (L'Acoustics, 2005).

Diámetro de la garganta	25 mm
Sección de salida	210 mm × 19,6 mm
Ángulo de cobertura horizontal	100°
Rango de frecuencia	1,3 kHz – 18 kHz
Dimensiones exteriores	220 mm × 120 mm × 141 mm

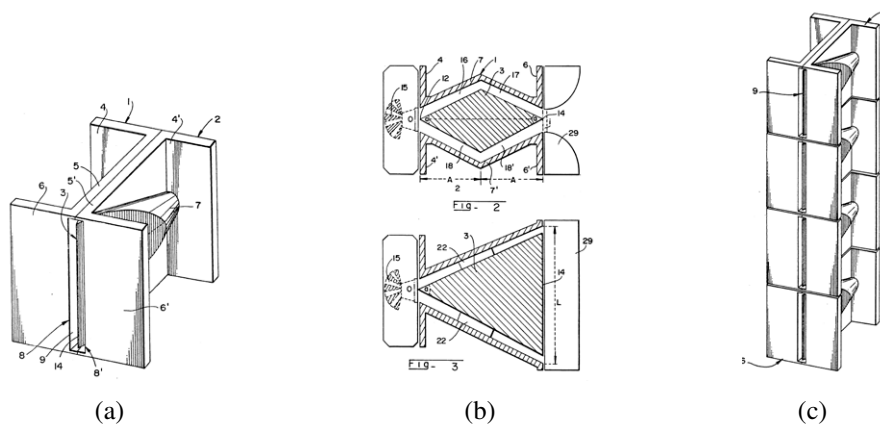


Figura 1: Geometría y arreglo lineal de guía de onda. (a) Geometría exterior (b) Secciones (c) Arreglo en línea. (Heil, 1992)

3. FORMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS

Para la solución de la ecuación de onda acústica en el marco del método de los elementos finitos en la formulación de *Galerkin* debe transformarse el problema diferencial o fuerte en uno integral o débil. La forma débil se obtiene multiplicando la ecuación de *Helmholtz* por un campo de presión virtual $\delta p(t, x_i)$ y aplicando el teorema de la divergencia (Bathe, 1996).

El resultado es la variación de la funcional:

$$\delta F[p] = \int_B (\delta p_{,i} p_{,i} - \delta p k^2 p) dV - \int_{\partial_n B} \delta p p_{,i} n_i dS, \quad (1)$$

donde $k = \omega/c$ es el número de onda angular. Entonces si una función p satisface $\delta F[p] = 0$ para toda δp compatible con las condiciones de frontera esenciales $p_t = p$ en $\partial_e B$ dicha función

es solución de la formulación fuerte del problema. Las condiciones de frontera naturales pueden reescribirse utilizando la conservación de la cantidad de movimiento lineal $\rho_0 \dot{v}_n = -n_i p_{,i}$ en $\partial_n \mathcal{B}$ siendo \ddot{u}_n la componente normal de la aceleración.

En el marco del método del elemento finito se utiliza un subespacio de funciones para satisfacer la variación de la funcional, la presión en el dominio de un elemento de N nodos es interpolada en la forma usual según

$$p = \sum_{I=1}^N \varphi_I(x_j) P_I(t); \quad p_{,i} = \sum_{I=1}^N \varphi_{I,i}(x_j) P_I(t). \quad (2)$$

Donde φ_I y P_I son las funciones de forma y presiones nodales I-ésimas respectivamente. Luego de integrar en el dominio del elemento y aplicar las condiciones de frontera esenciales (sobre p) se obtiene la ecuación del elemento finito

$$K_{IJ} P_J + M_{IJ} \ddot{P}_J = F_I, \quad (3)$$

donde el vector incógnita, en el espacio de elementos finitos, agrupa las presiones nodales. Los operadores lineales de rigidez e inercia se obtienen a partir de

$$K_{IJ} = \int_{\mathcal{B}} \varphi_{I,i} \varphi_{J,i} dV; \quad M_{IJ} = \int_{\mathcal{B}} \frac{1}{c^2} \varphi_I \varphi_J dV. \quad (4)$$

3.1. Modelo de elementos finitos

Para resolver la ecuación de *Helmholtz* en un dominio no acotado (infinito) mediante el método del elemento finito (u otro método) debe truncarse la malla computacional sin introducir fenómenos artificiales, en particular ondas reflejadas.

Las principales técnicas utilizadas en estas situaciones son los elementos infinitos y los *Perfectly Matched Layers (PML)*. Los últimos son elementos constituidos por materiales anisótropos obtenidos artificialmente a partir de la transformación de las ecuaciones de movimiento mediante la introducción de un sistema de coordenadas x' definido por

$$x_j = \beta_{(j)} x'_j; \quad \beta_{(j)} = 1 - \frac{ib_{(j)}}{\omega}. \quad (5)$$

Siendo b una constante de atenuación (Berenger, 1993). El efecto de esta transformación es la creación de un medio absorbente (sin reflexión) para cualquier dirección a la frecuencia ω . Esta región absorbente se extiende desde la frontera de la región de propagación hasta la del dominio truncado.

El modelo geométrico consta de una región interior o confinada por la guía de onda acústica, una región externa de propagación del campo cercano (*buffer*) y finalmente una región de absorción (*PML*). Debido a que la geometría del modelo acústico posee simetría respecto dos planos ortogonales se representa un cuarto del dominio truncado, como puede observarse en la Figura 2.

En el presente análisis acústico interesa conocer el campo de presión p cercano para el ensamble *driver*-guía de onda-difusor irradiando en campo libre. Las condiciones de frontera aplicadas en las superficies estructurales y planos de simetría son naturales y homogéneas, es decir $n_i p_{,i} = 0$. En la frontera exterior de la región *PML* la condición de frontera es esencial y corresponde a la presión no perturbada p_0 . En la superficie de radiación asociada al ensamble del

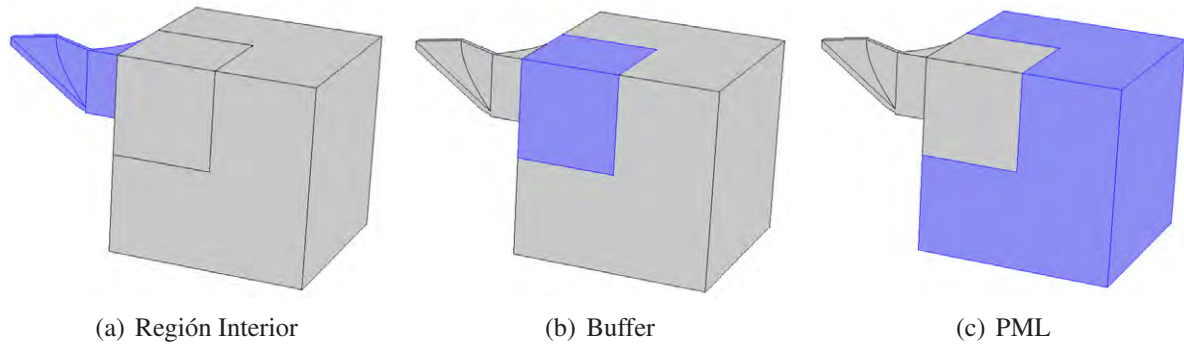


Figura 2: Regiones del modelo acústico utilizado.

driver con la guía de onda, la condición de frontera es esencial y la excitación se modela como una onda armónica plana de amplitud constante $p = \hat{p} e^{i\omega t}$.

Se utilizaron elementos acústicos tetraédricos y *PML* hexaédricos de segundo orden, la dimensión característica máxima de los elementos se calcula para que la discretización pueda representar la propagación de una onda con la longitud de onda crítica, es decir $c/(4f)$. Se implementaron 10 capas *PML* de espesor $c/(50f)$.

Resultados numéricos. Sobre el modelo descrito se realizó un análisis armónico en el tiempo de 1 kHz a 20 kHz a intervalos de 50 Hz. El resultado de este análisis es la presión nodal y via las funciones de forma permite obtener el campo de presión en la región no absorbente para las frecuencias seleccionadas. Para utilizar la información del análisis en la practica, deben posprocesarse los resultados con el objeto de caracterizar la directividad del dispositivo. Las formas de representación usuales son diagramas polares y de directividad, en ambos casos se utiliza el nivel de presión sonora

$$L_p = 20 \log (p_{\text{rms}}/p_{\text{ref}}) , \quad (6)$$

donde $p_{\text{ref}} = 20 \mu\text{Pa}$. Normalmente el nivel de presión se toma respecto del valor sobre el eje del dispositivo. Los diagramas polares muestran la variación del nivel de presión a una distancia radial específica (campo lejano) en función de la distancia angular al eje del dispositivo en el plano vertical (figura 3). La interferencia se hace evidente con aparición de lóbulos secundarios a medida que la frecuencia aumenta (figuras 3 de izquierda a derecha).

Los diagramas de directividad muestran el nivel de presión sonora en escala cromática como función de la distancia angular al eje del dispositivo (mediante una proyección cartesiana) y la frecuencia en el plano vertical (figura 4). En rigor se construyen a partir de la respuesta en frecuencia en las direcciones consideradas. Interpolando el nivel de presión se puede apreciar la variación del ángulo de cobertura identificando las curvas de nivel para una atenuación particular (por ej. -6 dB) respecto del eje del dispositivo.

Resultados experimentales. Para caracterizar experimentalmente la guía de onda se efectuó la medición de campo libre de la respuesta impulsiva y el análisis en tiempo real de la respuesta en frecuencia ante una excitación de ruido rosa. Para determinar la directividad, el dispositivo se monta sobre una base giratoria graduada en forma centrada para evitar que la distancia de medición cambie con el ángulo de rotación y con ello el nivel de presión. En la medición se uti-

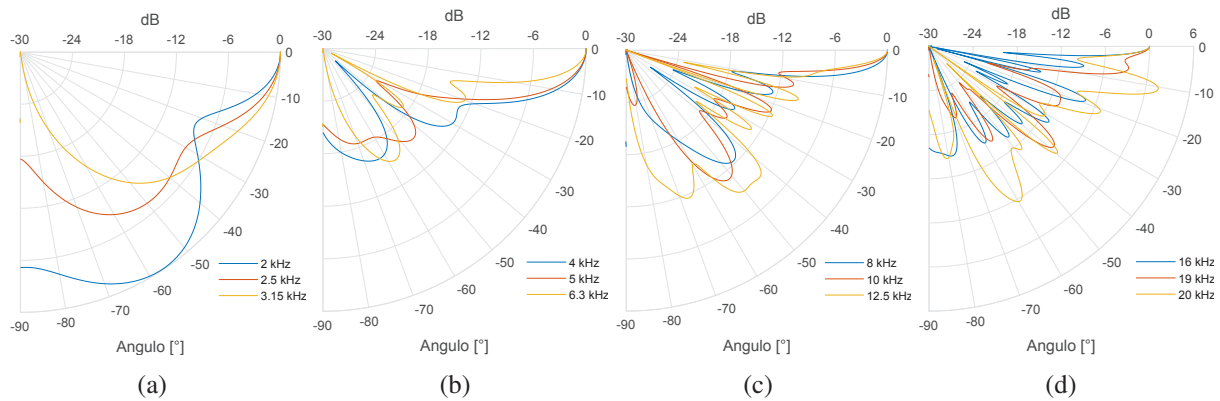


Figura 3: Diagramas polares en plano vertical.

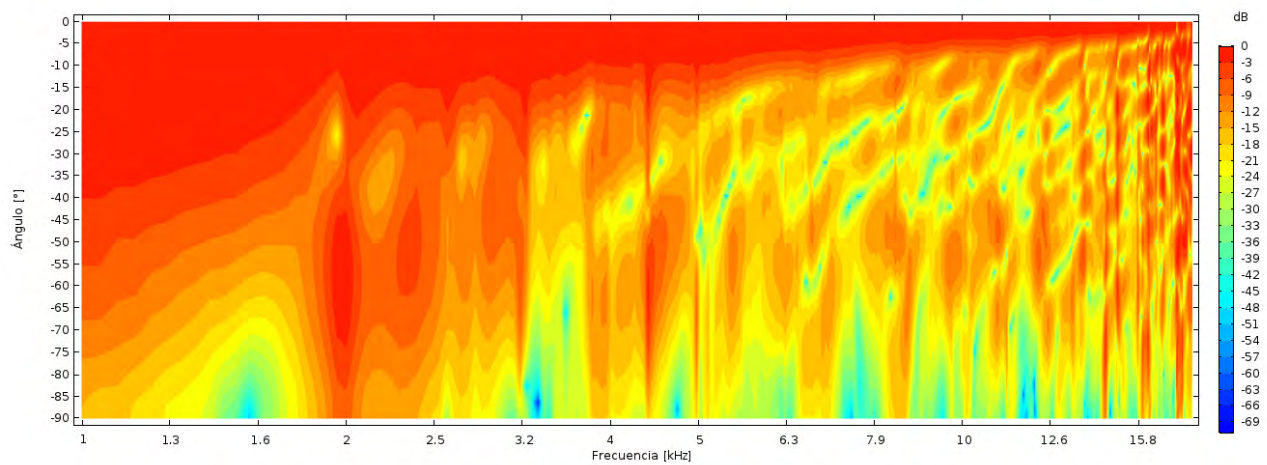


Figura 4: Diagrama de directividad simulado en el plano vertical.

lizo un micrófono *Isemcon* EMX-7150, una placa de audio *Roland* Octa-capture y el programa para medición y análisis de sonido *ARTA*.

la respuesta impulsiva del dispositivo se captura cada 5° a partir del eje de referencia. La respuesta en frecuencia se obtiene mediante la aplicación de la transformada rápida de *Fourier* (*FFT*). Debido a que en este caso el dispositivo es simétrico, teóricamente es suficiente medir sobre un cuadrante frontal frente al dispositivo.

Con el objeto de compararlos con los resultados numéricos, en la figuras 5 se presentan los diagramas de directividad obtenidos a partir de las mediciones en el plano vertical.

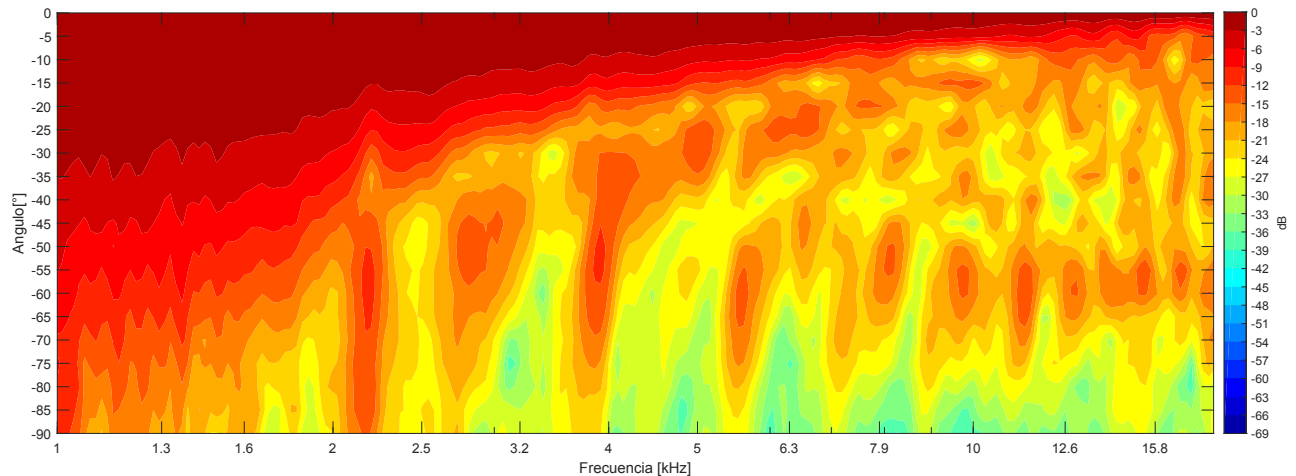


Figura 5: Diagrama de directividad medido en el plano vertical.

4. CONCLUSIONES

Se realizó el análisis armónico en el tiempo del modelo de elementos finitos de una guía de onda acústica (*tapered*) cuyos resultados fueron comparados con las mediciones de campo libre sobre el dispositivo instalado.

En general mientras la longitud característica de la fuente sea pequeña respecto de la longitud de onda la radiación será aproximadamente omnidireccional, con cambios menores del nivel de presión en función del desplazamiento angular respecto del eje del dispositivo. Cuando la longitud de onda disminuye y por debajo de la longitud característica de la fuente, se acentúa el efecto de la interferencia producto de la diferencia en los tiempos de arribo desde los puntos de la superficie de radiación.

Los diagramas polares simulados, figuras 3, muestran la presencia de lóbulos de presión secundarios generados por diferencias en arribos temporales para cada frecuencia del espectro de excitación. Estos y los diagramas de directividad están estrechamente relacionados, donde se aprecian picos en el nivel de presión fuera del eje del dispositivo, coincide con la presencia de lóbulos de presión secundarios en los diagramas polares.

Los resultados numéricos muestran directividad proporcional acentuada conforme aumenta la frecuencia en el plano vertical (figura 4). El acuerdo con las mediciones en el plano vertical se analiza comparando las figuras 4 y 5. Este en general es bueno, fundamentalmente a partir de 4 kHz. Por debajo de dicho valor la resolución espectral del análisis no permite capturar la respuesta medida.

REFERENCIAS

- Bathe K.J. *Finite elements of procedures*. McGraw Hill, New York, USA, 1996.
- Berenger J.P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114:185–200, 1993.
- Digón A.G. y Ferrer P. *Configuración y ajustes de sistemas de sonido, Curso Práctico*. Publicaciones Altaria, SL, 2015.
- Heil C. Sound wave guide US5163167. 1992.
- L'Acoustics. *V-DOSC operator manual versión 4*, 2005.